Министерство образования и науки Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

## ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ

Учебно-методическое пособие

НОВОСИБИРСК
2010

УДК 621 313 2(075 8)
Э 455

Рецензенты
д-р техн наук, проф *З С Темлякова*,
канд техн наук, доц *В В Пастухов*

Работа подготовлена на кафедре электромеханики
и утверждена Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебно-методического пособия
по курсовому проектированию

Э 455 **Электрические машины постоянного тока. Теория и расчет** учеб -метод пособие / Г А Шаншуров, В В Гречкин, А В Комаров, Т В Честюнина – Новосибирск Изд-во НГТУ, 2010 – 60 с

ISBN 978-5-7782-1403-3

Приведены положения теории необходимые для расчета электромагнитных процессов и выбора параметров электрических машин предназначенных для преобразования энергии на основе электромагнитной индукции и взаимодействия магнитного поля с электрическим током

Предназначено для студентов заочного факультета, обучающихся по направлениям «Мехатроника и автоматизация», «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» и не изучавших курса проектирования электрических машин

**УДК 621.313.2(075.8)**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА**
**ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ**

**Учебно-методическое пособие**

Редактор *Л.Н. Ветчакова*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Дизайн обложки *А.В Ладыжская*
Компьютерная верстка *В Ф Ноздрева*

---

Подписано в печать 25 05 2010 Формат 60×84 1/16 Бумага офсетная Тираж 200 экз
Уч -изд л 3 48 Печ л 3 75 Изд № 114 Заказ № Цена договорная

---

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630092 г Новосибирск пр К Маркса 20

**ISBN 978-5-7782-1403-3**

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Требования, предъявляемые к профессиональной подготовке специалиста, разнообразны Современный инженер должен уметь анализировать необходимую информацию, технические данные, показатели и результаты работы, обобщать и систематизировать их, проводить необходимые расчеты, использовать современные технические средства и информационные технологии

Предлагаемое пособие по курсовому проектированию составлено для оказания помощи студентам в самостоятельном изучении вопросов теории *электрических машин* (Г1)*, ее применения в разработке *электродвигателя* (Г2) *постоянного тока*, снабженного *коллектором* (Г3) с определенными свойствами

Курсовая работа – одна из форм самостоятельной работы студентов, помогающая развивать навыки анализа полученных расчетным путем материалов, а также сформировать самостоятельные суждения и использовать полученные знания в практической трудовой деятельности

Для оформления курсовой работы следует использовать компьютерные технологии, выполнять расчеты с использованием современных программных продуктов, навыки работы с которыми получены в курсе «Информатика» На кафедру представляется текстовый вариант, оформленный по требованиям ГОСТ 7 32-2001, отчет о научно-исследовательской работе общие требования и правила составления

Курсовая работа включает в себя основные технические требования на проектируемую машину, перечень и содержание основных разделов пояснительной записки и графической части работы Настоящее пособие знакомит с необходимым минимумом стандартов, которым должна соответствовать проектируемая электрическая машина, а также с методикой расчета элементов машины и ее параметров

Бланк задания (приложение 3) содержит график работы над проектом, которого студент заочного обучения может придерживаться, согласуя каждый этап работы с преподавателем на консультациях в межсессионный период

---

* В скобках указана позиция термина из глоссария

# ВВЕДЕНИЕ

## В1. Устройство электрической машины постоянного тока (рис. В1)

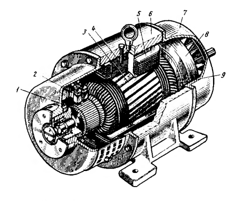



*Рис В1* Двигатель постоянного тока

*1* – коллектор, *2* – щетки, *3* – сердечник якоря, *4* – сердечник главного полюса, *5* – полюсная катушка, *6* – станина, *7* – подшипниковый щит, *8* – вентилятор, *9* – обмотка якоря

## В2. Конструктивные элементы статора (рис. В2–В5)

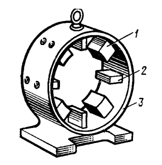



*Рис В2* Неподвижная часть машины постоянного тока

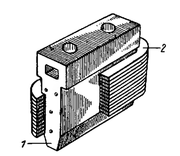



*Рис В3* Добавочный полюс *1* – сердечник, *2* – полюсная катушка

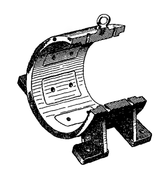


*Рис В4* Станина машины постоянного тока

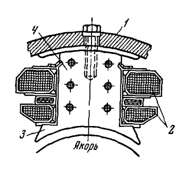
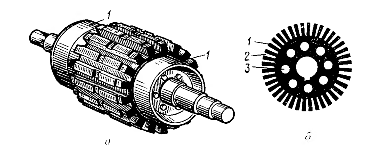



*Рис В5* Главный полюс

*1* – станина, *2* – полюсная катушка, *3* – полюсный наконечник, *4* – сердечник полюса

## В3. Конструктивные элементы ротора (рис. В6–В9)



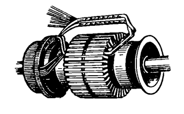




*Рис В6* Сердечник якоря

*а* – якорь без обмотки, *б* – стальной лист сердечника якоря, *в* – необмотанный якорь машины постоянного тока

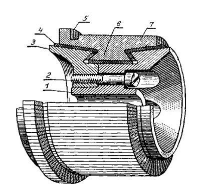



*Рис В7* Устройство коллектора *1* – корпус коллектора, *2* – стяжной болт, *3* – нажимное кольцо, *4* – изоляция (миканит), *5* – «петушок», *6* – «ласточкин хвост», *7* – пластины

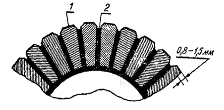



*Рис В8* Расположение коллекторных пластин (*1*) и изоляционных прокладок (*2*) в коллекторе

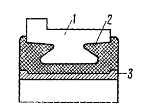
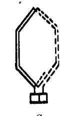


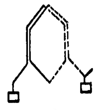

*Рис В9* Коллектор на пластмассе

*1* – коллекторная пластина, *2* – пластмасса, *3* – стальная втулка

## В4. Конструктивные элементы обмотки якоря (рис. В10–В12)



*а*



*б*

*Рис В10* Двухвитковые секции обмоток

*а* – простой петлевой, *б* – простой волновой

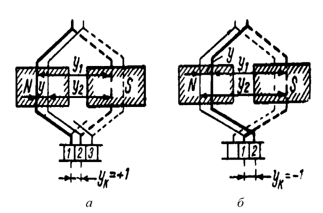



*Рис В11* Простая петлевая обмотка

*а* – правая, *б* – левая

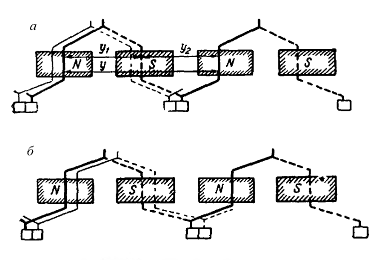



*Рис В12* Простая волновая обмотка

*а* – левая, *б* – правая

- В двигателях постоянного тока (рис. В1) к щеткам подводится постоянный ток Роль коллектора (рис. В7–В9) в этом случае состоит в том, чтобы в любой момент времени обеспечить такое распределение тока по обмотке якоря (рис. В10–В12), при котором под полюсами (рис. В5) разной полярности располагались бы проводники с противоположным направлением тока.
- По отношению к выводам сети обмотка якоря разбивается на параллельные ветви. Параллельной ветвью называют группу последовательно соединенных проводников, включенных между щетками разной полярности.
- Электродвижущая сила на выводах машины при холостом ходе (без нагрузки) будет равна ЭДС одной параллельной ветви, а ток в сети при нагрузке будет равен сумме токов параллельных ветвей.
- В замкнутом контуре самой обмотки якоря машины постоянного тока сумма ЭДС равна нулю, поэтому при разомкнутой внешней цепи ток в обмотке возникать не будет.

## В5. Система охлаждения двигателя смешанного возбуждения (рис. В13)

Двигатель выполнен с аксиальной системой вентиляции (рис В13).

Вентилятор установлен на выходе охлаждающего воздуха, обеспечивая вытяжную систему вентиляции. Через коллектор проходит поток газа без подогрева потерями в машине. Поток движется параллельно оси машины, обтекая коллектор, обмотки возбуждения, лобовые части обмотки якоря, магнитопровод ротора, рис. В13.

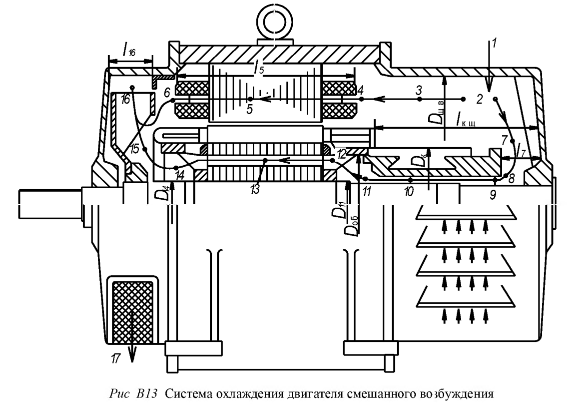



*Рис В13* Система охлаждения двигателя смешанного возбуждения

## В6. Потери вращающейся электрической (рис. В14)

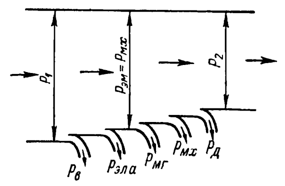



*Рис В14* Энергетическая диаграмма двигателя смешанного возбуждения

Потери – мощность (рис. В14), теряемая вращающейся электрической машиной в процессе преобразования энергии. Выделяют основные и добавочные потери.

Основные потери это:

- $P_в$ – на возбуждение в параллельной обмотке,
- $P_{эл\,а}$ – электрические в цепи обмотки якоря (Г22),
- $P_{мг}$ – магнитные (Г10),
- $P_{мх}$ – механические (Г23).

Добавочные потери $P_д$ (Г24).

Электрические машины определенного класса сегодня выпускают серийно Особенности двигателей серии 2П [1, 2] необходимо отразить в пояснительной записке к курсовой работе.

## В7. Объект расчета: двигатель постоянного тока смешанного возбуждения (рис. В15)

В двигателе (рис В1, В15) со *смешанным возбуждением* (Г4) магнитный поток Ф создается в результате совместного действия двух *обмоток возбуждения* (Г5) — параллельной и последовательной Поэтому его *скоростная характеристика* (Г6) располагается (кривые *3* и *4*) между характеристиками двигателей с параллельной (кривая *1*)

и последовательной (кривая *2*) схемой возбуждения В зависимости от соотношения МДС параллельной и последовательной обмоток при номинальном режиме можно приблизить характеристику двигателя со смешанным возбуждением к характеристике *1* (при малой МДС последовательной обмотки) или к характеристике *2* (при малой МДС параллельной обмотки) Таким образом, характеристики двигателя со смешанным возбуждением являются промежуточными между характеристиками двигателей с параллельным и последовательным возбуждением, причем по желанию можно выполнить двигатель с любой промежуточной характеристикой

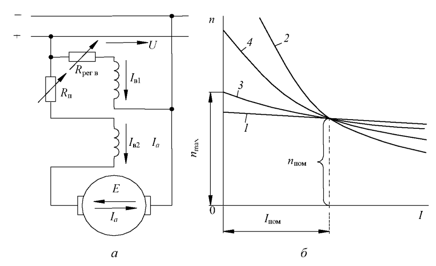



*Рис В15* Двигатель со смешанным возбуждением

*а* – схема включения обмоток, *б* – скоростные характеристики

Одной из задач проекта является обеспечение требуемых частот вращения в рабочем режиме и на холостом ходу (номинальная и максимальная частоты вращения)

# 1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ

Расчет электрической машины – процесс циклический (рис 1.1): после каждого этапа по ряду критериев принимается решение на продолжение расчета или возврат для коррекции ранее принятых решений.

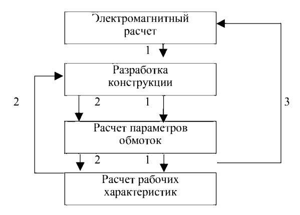



*Рис 1 1* Блок-схема расчета электрической машины

Величина электромагнитного момента $M_{эм}$, создаваемого двигателем, определяется, с одной стороны, его главными размерами $D^2 l_\delta$ (диаметром ротора и его длиной) и электромагнитными нагрузками $A$ (линейной нагрузкой) и $B_\delta$ (индукцией в воздушном зазоре между главным полюсом и ротором)

$$M_{эм} = \frac{pAB_{\delta ср}}{2a} l\tau D .$$

С другой стороны, она определяется техническим заданием (номинальная мощность $P_{ном}$ и угловой частотой вращения $\omega_н$)

$$M_{эм} = P_{ном} \frac{1+\eta}{2\eta\omega_н} .$$

Величина линейной нагрузки $A$ (А/м$^2$)

$$A = \frac{I_п N}{\pi D 2a}$$

определяется в основном допустимой температурой нагрева обмотки якоря, а индукция в воздушном зазоре между главным полюсом и ротором $B_\delta$ (Тл) ограничивается магнитными свойствами пакета ротора (предельно допустимой индукцией в зубцах).
Здесь:

- коэффициент полезного действия $\eta$;
- число пар полюсов и параллельных ветвей обмотки якоря – $p$ и $2a$;
- длина, диаметр ротора и полюсное деление – $l$, $D$, $\tau$;
- число проводников обмотки якоря – $N$;
- номинальный потребляемый ток – $I_н$.

Приведенные соотношения определяют методику (цикл) проектирования:

- номинальная мощность $P_{ном}$ и угловая частота вращения $\omega_н \rightarrow$
- электромагнитный момент $M_{эм} \rightarrow$
- главные размеры $D^2 l_\delta \rightarrow$
- электромагнитные нагрузки $A$ и $B_\delta \rightarrow$
- номинальная мощность $P_{ном}$ и угловой частотой вращения $\omega_н$

## 1.1. ВЫБОР ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ НАГРУЗОК И ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ

Предварительно электромагнитные нагрузки $A$ и $B_\delta$ следует выбирать в пределах рекомендованных в методике значений для заданного типоразмера машины, где $A$ - это линейная нагрузка, а $B_\delta$ - амплитуда индукции в воздушном зазоре. Так как допускается относительно широкое варьирование этих величин, то при проектировании необходимо руководствоваться следующим. Выбор больших (по верхним пределам допустимых областей) значений для обеих величин $A$ и $B_\delta$ приводит к уменьшению габаритов машины и ее весовых показателей, но одновременно ухудшает энергетические показатели и увеличивает перегрев частей электрической машины.

Если $A$ и $B_\delta$ выбрать ближе к низшим пределам области, то размеры машины увеличиваются. При этом объем ее активной части остается недоиспользованным Для правильного выбора электромагнитных нагрузок следует учесть, что от их соотношения в значительной мере зависят особенности основных характеристик машины, определяемых

дополнительными требованиями технического задания или предполагаемыми условиями работы проектируемой машины.

Выбранные значения $A$ и $B_\delta$ определяют только необходимый «объем» активной части машины $D^2 l_\delta$, который может быть получен при различных соотношениях главных размеров.

Выбранные значения $A$ и $B_\delta$ после расчета *обмотки якоря* ( Г7) также могут несколько измениться, однако при этом никаких пересчетов и корректировки главных размеров, как правило, не требуется.

1. Предварительное значение η (КПД) от номинальной мощности для двигателя выбираем исходя из накопленного опыта создания электрических машин (см. [1, рис.11.7]).

Для проектируемых двигателей КПД выбираем из табл. 1.1

Таблица 1.1

| | | | |
|---|---|---|---|
| $P_н$, кВт | 10 | 30 | 100 |
| $\eta_н$ % | 82 | 86 | 89 |
| $K_в = I_в / I_н$ | 0,035 | 0,033 | 0,02 |

2. Предварительное значение тока двигателя, А

$$I_{ном1} = \frac{P_{ном}}{\eta U_{ном}} .$$

3. Ток якоря, А

$$I_{ном} = (1 - k_в) I_{ном1} ,$$

где $k_в$ – коэффициент, определяющий отношение тока возбуждения к току якоря, определяется исходя из мощности машины, табл. 1.1 (см. [1, табл. 11.8]).

4. Электромагнитная мощность, Вт

$$P = P_{ном} \frac{1+\eta}{2\eta} .$$

5. Диаметр якоря $D$ и связанные с ним электромагнитные нагрузки выбираем по заданной высоте оси вращения из табл. 1.2.

Таблица 1.2

| $h$, мм | 80 | 90 | 100 | 112 | 132 | 160 | 180 | 200 | 225 | 250 | 280 | 315 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $D$, мм | 73 | 82 | 93 | 109 | 130 | 160 | 181 | 202 | 230 | 258 | 290 | 330 |
| $A\cdot10^{4}$, А/м | 0,9 | 1,0 | 1,1 | 1,3 | 1,5 | 1,8 | 2,1 | 2,3 | 2,6 | 2,9 | 3,2 | 3,9 |
| $B_\delta$, Тл | 0,57 | 0,58 | 0,58 | 0,6 | 0,62 | 0,65 | 0,66 | 0,68 | 0,71 | 0,73 | 0,76 | 0,8 |
| $\alpha_\delta$, о.е. | 0,56 | 0,57 | 0,58 | 0,59 | 0,6 | 0,61 | 0,62 | 0,63 | 0,64 | 0,65 | 0,66 | 0,67 |

6. Выбираем линейную нагрузку якоря $A$, А/м (см. [1, рис. 11.9]).

7. Выбираем величину *магнитной индукции* (Г8) в *воздушном зазоре* (Г9) $B_\delta$, Тл (см. [1, рис. 11.10]) и расчетный коэффициент полюсной дуги $\alpha_\delta$ (см. [1, рис. 11.8]) и табл. 1.2.

8. Расчетная длина якоря, м

$$l_\delta = \frac{6{,}1P}{\alpha_\delta A B_\delta D^2 n_{\text{ном}}}.$$

9. Отношение длины магнитопровода якоря к его диаметру

$$\lambda = \frac{l_\delta}{D}$$

для проектируемого класса двигателей находится в диапазоне 1,2…0,8.

Эта величина определяет ряд характеристик электродвигателей: неравномерность нагрева конструктивных элементов в продольном направлении, качество охлаждения и время разгона и другие показатели, которые в общем случае находятся в противоречии.

## 1.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ И ОБМОТКИ ЯКОРЯ

Одна из задач электромагнитного расчета при проектировании электрической машины заключается в формировании структуры магнитной системы преобразователя и выборе параметров обмотки якоря, по которой протекает ток нагрузки. В современных электрических машинах якорные обмотки размещают в пазах магнитной системы, в машинах постоянного тока – в пазах магнитной системы ротора (см. рис. В2).

Индуктор – источник поля возбуждения электрической машины расположен на статоре: сосредоточенные катушки из медного провода на магнитных сердечниках (полюсах) сложной конфигурации.

### 1.2.1. ЧИСЛО ПОЛЮСОВ

Число полюсов машины (см. рис. В2, В5) выбирается в зависимости от диаметра якоря по соответствующим рекомендациям При этом надо иметь в виду, что увеличение $2p$ приводит к уменьшению магнитного потока на полюсе (при выбранной индукции) и шага обмотки, а следовательно, и к уменьшению сечения магнитопровода, т е к снижению веса и габаритов всей машины. Однако с увеличением числа полюсов усложняется конструкция машины, увеличивается трудоемкость ее изготовления, растет среднее напряжение между пластинами коллектора и увеличиваются *магнитные потери* (Г10) в стали якоря из-за увеличения частоты перемагничивания. Аналог проектируемого двигателя двигатель серии 2ПН, он выполняется с числом полюсов $2p = 4$.

10. Выбираем число полюсов $2p$ в соответствии с рекомендациями

11. Полюсное деление, м

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}.$$

12. Расчетная ширина полюсного наконечника, м

$$b_\delta = \alpha_\delta \tau .$$

13. Действительная ширина полюсного наконечника при эксцентричном зазоре равна расчетной величине, м

$$b_p = b_\delta .$$

### 1.2.2. ОБМОТКА, ПАЗЫ И ЯРМО ЯКОРЯ

Основной задачей настоящего раздела является размещение в зубцовой зоне якоря проводников обмотки, число которых ($N$) определяется выбранными ранее величинами $A$, $B_\delta$ и $2p$.

Для этого рассматривают несколько вариантов обмотки с различными числами реальных *пазов* (Г11) $Z$, элементарных пазов (число секций в якорной катушке) $U_п$ и витков секции $w_с$ и выбирают наи-

лучший из них, численно совпадающий с предварительно определенным числом эффективных проводников $N$. Если на якоре предполагается применить волновую обмотку, следует учесть, что она может быть выполнена симметричной не при всяком соотношении значений $U_п$, $w_с$, и $2p$; применение обмотки с «мертвой» секцией должно быть детально обосновано и при массовом производстве не рекомендуется.

Число параллельных ветвей простой волновой обмотки $2a = 2$. Обмотку, как правило, выполняют симметричной, что осуществимо, если $U_п$ не имеет общего делителя с $p$ Например, при $p = 2$ значение $U_п$ может быть равно 3 или 5, но не 2 или 4. Для улучшения коммутации и уменьшения пульсации магнитного потока $Z/2p$ должно равняться дробному числу

$$\frac{Z}{2p} = A + \frac{b}{c},$$

где $A$ – любое целое число; $c$ – знаменатель дроби, на который $2p$ должно делиться без остатка, но не быть после сокращения дроби равным двум; $b$   числитель дроби в пределах от 1 до ($c$   1). Отсюда следует, что у четырех полюсных двигателей значение $Z/2p$ равно $A + 1/4$ или $A + 3/4$, а $Z/p$ – целое число $+0{,}5$.

Простая волновая обмотка не требует уравнительных соединений.

У двигателей с высотами оси вращения $h \leq 315$ мм применяют равносекционную обмотку. Для улучшения коммутации двигателей с $h \geq 355$ м, работающих в более тяжелых условиях, волновую обмотку выполняют ступенчатой.

Таблица 13

| $2p$ | $2a$ | $Z_2$ | $K$ | $Z_2/p$ | $K/p$ | $U_п$ | $y_п$ | $y - y_к$ | $y_1$ | $y_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 2 | Нечетное | Нечетное | Целое + 0,5 | Целое + 0,5 | 1, 3, 5 | $(z_2/2p) \pm \varepsilon$ = целое число | $(k \pm 1)/p$ | $U_п y_п$ | $Y - y_1$ |

Для унификации штампов в некоторых случаях применяют несимметричную обмотку с «мертвыми» секциями, не присоединяемыми

к коллектору Такое исполнение с одной «мертвой» секцией в двигателях мощностью до 100 кВт и при $K > 100$ не ухудшает (Г12) коммутации. При выборе параметров простой волновой равносекционной обмотки следует обращаться к табл. 1.3.

### 1.2.3. ВЫБОР ОБМОТКИ ЯКОРЯ

14. Выбираем простую волновую обмотку с числом параллельных ветвей $2a = 2$.

15. Ток параллельной ветви, А

$$I_a = \frac{I_{\text{ном}}}{2a}.$$

16. Предварительное общее число эффективных проводников

$$N = \frac{\pi D A}{I_a}.$$

17. Крайние пределы чисел пазов якоря

$$Z_{\min} = \frac{\pi D}{t_{z1\max}}; \quad Z_{\max} = \frac{\pi D}{t_{z1\min}},$$

где $t_{z1\max}$ и $t_{z1\min}$ соответственно максимальная и минимальная величина зубцового деления

Для высот оси вращения $h = 80 - 200$ мм ориентировочные значения $t_{z1} = 10 - 20$ мм

Из полученного диапазона чисел пазов предварительно задаемся числом пазов якоря $Z$ (следует уточнить в п. 20 настоящего расчета)

Зубцовое деление якоря, м

$$t_{z1} = \frac{\pi D}{Z}.$$

18. Число эффективных проводников в пазу

$$N_{\text{п}} = \frac{N}{Z}$$

округляем до целого числа, после этого уточняем общее число эффективных проводников

$$N = N_{\text{п}} Z.$$

19 Выбираем полузакрытый паз (рис 1 2) овальной формы с параллельными сторонами зубца (Г13)

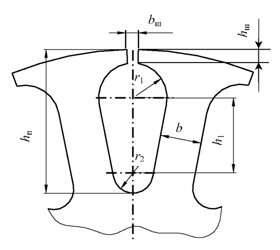



*Рис 1 2* Паз якоря

20 Число коллекторных пластин $K$ для различных значений $U_п = K/Z$ выбираем по табл 1 4

Таблица 1 4

| Номер варианта | $U_п$ | $Z$ | $K = U_п Z$ | $w_с = N/2K$ | $U_{к\,ср} = 2pU_{ном}/K$, В |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |

В таблице рассматриваем три значения $U_п$ = 1, 3, 5 и для каждого значения $U_п$ рассматриваем все возможные значения числа пазов от минимального до максимального

Здесь $U_п$ – число секций в якорной катушке, $w_с$ – среднее число витков в секции, $U_{к\,ср}$ – напряжение между коллекторными пластинами

Величина напряжения между коллекторными пластинами не должна превышать 16 В При выборе окончательного варианта следует учесть, что в реальной машине среднее число витков в секции может быть не целым числом Число витков в секциях, расположенных в одном реальном пазу, может быть выбрано отличающимся на единицу,

например, при $U_п = 3$: $w_{c1} = 2$, $w_{c2} = 3$, $w_{c3} = 2$, тогда число эффективных проводников

$$N = 2Z\sum_i w_{c_i} ,$$

где среднее значение $w_c = 7/3 = 2{,}33$.

После выбора окончательного варианта следует сравнить число пазов $Z$ с выбранным в п. 17 настоящего расчета, при необходимости расчет повторить

Эквивалентное число пазов

$$Z_{экв} = K .$$

Число проводников в секции

$$N_c = \frac{N}{2w_c} .$$

21. Уточняем линейную нагрузку, А/м

$$A = \frac{NI_a}{\pi D} .$$

22. Корректируем длину якоря, м

$$l_\delta = \frac{6{,}1P}{\alpha_\delta AB_\delta D^2 n_{ном}} .$$

23. Наружный диаметр коллектора при полузакрытых пазах, м

$$D_{k\max} = 0{,}8D ; \qquad D_{k\min} = 0{,}65D .$$

Из ряда предпочтительных чисел.

56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 125, 140, 160, 180, 200..

(см. [1, § 11 4, с 608–609]) выбираем диаметр коллектора $D_k$

24. Окружная скорость коллектора, м/с

$$v_k = \frac{\pi D_k n_{ном}}{60} .$$

25. Коллекторное деление, м

$$t_k = \frac{\pi D_k}{K}.$$

26. Полный ток паза, А

$$I_п = \frac{\pi D A}{Z}.$$

27. Предварительное значение плотности тока в обмотке, А/м$^2$

Предварительно (табл. 1.5) выбираем пропорциональным пересчетом (см. [1; рис  11 11]) значение $AJ_a$, тогда

$$J_a = \frac{AJ_a}{A}.$$

Таблица 15

| $D$, мм | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 |
|---|---|---|---|---|---|
| $AJ$, А$^2$/м | $1\ 10^{11}$ | $1{,}4\ 10^{11}$ | $1,\ 8\ 10^{11}$ | $2\ 10^{11}$ | $2,\ 2\ 10^{11}$ |

28. Сечение эффективного провода, м$^2$. Предварительное значение

$$q = \frac{I_a}{J_a}.$$

Выбираем всыпную обмотку с круглыми проводниками (табл  1 6), где

марка провода – ПЭТВ (см. [1, табл. П3.1]),

диаметр неизолированного проводника $d_г$, м,

диаметр изолированного проводника $d_{из}$, м,

– площадь поперечного сечения голого провода $q_{эл}$, мм$^2$.

Для повышения надежности всыпной обмотки и облегчения ее укладки диаметр изолированного провода не должен превышать 1,8 мм. При больших значениях диаметра эффективные проводники  подразделяют на элементарные.

Выбираем число элементарных проводников $n_{эл}$, сечение провода $q_{эл}$, мм$^2$

Окончательное значение сечения эффективного проводника обмотки якоря

$$q = q_{эл} n_{эл}.$$

Т а б л и ц а  1 6

| $d_г$ мм | / $d_{из}$ мм | / $q_{эл}$, мм$^2$ | $d_г$, мм | / $d_{из}$, мм | / $q_{эл}$, мм$^2$ | $d_г$ мм | / $d_{из}$ мм | / $q_{эл}$, мм$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,08 | 0,1 | 0,00502 | 0,315 | 0,35 | 0,0779 | 0,85 | 0,915 | 0,567 |
| 0,09 | 0,11 | 0,00636 | 0,335 | 0,37 | 0,0881 | 0,9 | 0,965 | 0,636 |
| 0,1 | 0,122 | 0,00785 | 0,355 | 0,395 | 0,099 | 0,95 | 1,015 | 0,709 |
| 0,112 | 0,134 | 0,00985 | 0,375 | 0,415 | 0,1104 | 1,0 | 1,08 | 0,785 |
| 0,125 | 0,147 | 0,01227 | 0,4 | 0,44 | 0,1257 | 1,06 | 1,14 | 0,883 |
| 0,14 | 0,162 | 0,01539 | 0,425 | 0,565 | 0,1419 | 1 12 | 1 2 | 0,985 |
| 0,15 | 0,18 | 0,01767 | 0,45 | 0,49 | 0,159 | 1,18 | 1,26 | 1,094 |
| 0,16 | 0,19 | 0,0201 | 0,5 | 0,545 | 0,1963 | 1,24 | 1,33 | 1,227 |
| 0,17 | 0,2 | 0,0227 | 0,56 | 0,615 | 0,246 | 1,32 | 1,405 | 1,368 |
| 0,18 | 0,21 | 0,0255 | 0,6 | 0,655 | 0,283 | 1,4 | 1,485 | 1,539 |
| 0,2 | 0,23 | 0,0314 | 0 63 | 0,69 | 0,312 | 1,5 | 1,585 | 1,767 |
| 0,224 | 0,259 | 0,0394 | 0,71 | 0,77 | 0,396 | 1,6 | 1,685 | 2,011 |
| 0,25 | 0,285 | 0 0491 | 0,75 | 0 815 | 0,442 | 1,7 | 1,785 | 2,27 |
| 0,28 | 0,315 | 0,0616 | 0,8 | 0,865 | 0,503 | 1,8 | 1,895 | 2,54 |

Спецификация паза якоря приведена в табл  1 7

Т а б л и ц а  1 7

| Номер позиции | Наименование | Толщина | Число слоев |
|---|---|---|---|
| 1 | Обмотка | – | – |
| 2 | Изофлекс | 0,16 мм | 1 |
| 3 | Стеклотекстолит | 1 мм | 1 |

### 1.2.4. РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИИ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ

Для магнитопровода якоря принимаем сталь марки 2312

29  Сечение полузакрытого паза $S_0$ (см  [1, рис  11 21]) при предварительно принятом коэффициенте заполнения паза $k_з$ от 0,68 до 0,72

$$S_0 - \frac{N_п n_{эл} d_{из}^2}{k_з}.$$

Эскиз зубцово-пазовой зоны приведён на рис. 11.13 [1]

30. Высота паза (табл. 1.8) предварительно $h_п$, м (по рис. 11 12 [1])

Таблица 1 8

| $D$, мм | 50 | 100 | 150 | 200 | 320 |
|---|---|---|---|---|---|
| $h_п$, мм | 16 | 20 | 22 | 28 | 35 |

Высота шлица паза $h_ш \approx (0{,}5\ldots0{,}8)10^{\ 3}$ м.

Ширина шлица паза $b_ш$, м. Ширина шлица принимается больше суммы максимального диаметра изолированного проводника и двусторонней толщины изоляции.

31. Ширина зубца, м

$$b_z = \frac{B_\delta t_{z1}}{B_z k_c},$$

где $B_z$ – допустимое значение индукции в стали зубца, выбирается (см. [1, табл. 11 9]) по частоте перемагничивания стали зубцов (табл 1.9), где

$$f = pn/60, \quad \text{при} \quad p = 2;$$

Таблица 1 9

| $n_н$, об/мин | 3000 | 2250 | 1500 | 750 |
|---|---|---|---|---|
| $f$, гц | 100 | 75 | 50 | 25 и ниже |
| $Bz$, Тл | 1,4 1,6 | 1,5 1,7 | 1,55 1,75 | 1,6 1,8 |

$k_c$ · коэффициент заполнения магнитопровода якоря сталью из табл. 1.10.

Таблица 1 10

| Толщина листа, мм | Изоляция листов | |
|---|---|---|
| | оксидированных | лакированных |
| 1 | 0,98 | 0,97 |

| | | |
|---|---|---|
| **0,5** | 0,95 | **0,93** |
| 0,35 | 0,93 | 0,91 |
| 0,3 | 0,92 | 0,89 |
| 0,28 | 0,91 | 0,88 |

32. Больший радиус, м

$$r_1 = \frac{\pi\ \ D - 2h_{ш}\ \ - Zb_z}{2\ \ \pi + Z}.$$

33. Меньший радиус, м

$$r_2 - \frac{\pi\ \ D - 2_{п}\ \ - Zb_z}{2\ \ Z - \pi}.$$

34. Расстояние между центрами радиусов, м

$$h_1 = h_{п} - h_{ш} - r_1 - r_2.$$

35. Минимальное сечение зубцов якоря, $S_z$ м$^2$; расчетное сечение паза $S_{п}$ м$^2$, при большом различии $S_{п}$ , $S_0$ размеры паза корректируются

$$S_z = \frac{Z\alpha_\delta b_z l_\delta k_c}{2p}; \quad S_{п} = \frac{\pi}{2}\ \ r_1^2 + r_2^2\ \ +\ \ r_1 + r_2\ \ h_1.$$

36. Предварительное значение ЭДС, В

$$E_{ном} = U_{ном} K_{д},$$

где $K_т$ – коэффициент, учитывающий внутреннее падение напряжения, для мощностей в диапазоне 10. ..100 кВт $K_д$ – 0,85.. 0,97 (см. [1, табл. 11.8])

37. Предварительное значение магнитного потока на полюс в случае простой волновой обмотки, Вб

$$\Phi_{\delta ном} = \frac{60 E_{ном}}{pNn_{ном}}.$$

38. Индукция в сечении зубцов, Тл

$$B_z = \frac{\Phi_{\text{δном}}}{S_z} .$$

### 1.2.5. РАСЧЕТ ОБМОТКИ ЯКОРЯ

39. Длина лобовой части витка, м

$$l_{\text{л}} = 1{,}35\tau .$$

40. Средняя длина витка обмотки якоря (рис. 1.3), м

$$l_{a\text{ср}} = 2 \;\; l_{\text{п}} + l_{\text{л}} \;\; ,$$

где $l_{\text{п}}$ – длина паза якоря, принимаем равной длине якоря $l_{\delta}$.

41. Полная длина обмотки якоря, м

$$L_{\text{м}a} = \frac{N l_{a\text{ср}}}{2} .$$

42. Сопротивление обмотки якоря при 20 °C, Ом

$$R_a - \frac{L_{\text{м}a}}{57 \cdot 10^6 q_a \;\; 2a \;\; ^2} ,$$

здесь $q_a - q$

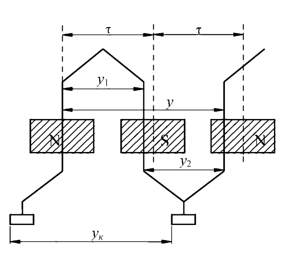



*Рис 1 3* Фрагмент схемы волновой обмотки

43. Сопротивление обмотки якоря при 75 ºС, Ом

$$R_{ан} = 1,22 R_a.$$

44. Масса меди обмотки якоря, кг

$$m_{ма} = 8900 L_{ма} q_a.$$

45. Расчет шагов обмотки:
а) шаг по коллектору и результирующий шаг

$$y_k = \frac{K-1}{p}; \quad y = y_k;$$

б) первый частичный шаг

$$y_1 = \frac{K}{2p} \quad \varepsilon,$$

здесь ε – см в табл. 1.3;
в) второй частичный шаг

$$y_2 = y_k - y_1.$$

## 1.3. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

### 1.3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Размеры главных полюсов, диаметр и толщину станины выбирают минимальной величины исходя из допустимого уровня индукции в них, условия размещения обмоток возбуждения и механической прочности. Внутренний диаметр станины определяется предварительно и уточняется после расчета обмоток возбуждения и составления эскиза их расположения (рис. 1.4) на *полюсах* (Г14).

Увеличение воздушного зазора приводит к уменьшению влияния *реакции якоря* (Г15), но требует увеличения мощности обмоток возбуждения.

46. Предварительное значение внутреннего диаметра якоря и диаметра вала, м

$$D_0 = 27 \cdot 10^{-3} \sqrt[3]{\frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}}}.$$

Согласно табл. 1.11 выбираем стандартизированное значение $D_0$

Таблица 1 11

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $D_0$ мм | 24 | 28 | 38 | 50 | 55 | 60 | 65 |

47. Высота спинки якоря (см. [1, рис. 11.13]), м

$$h_J = \frac{D - D_0}{2} - h_{\text{п}}.$$

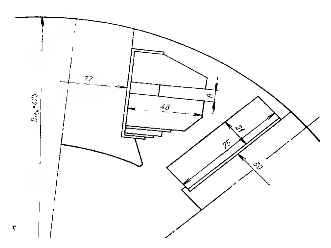



*Рис 1 4* Эскиз главного и добавочного полюсов с обмотками возбуждения и обмоткой добавочного полюса

48. Для сердечников главных полюсов (см. рис. В5) выбираем сталь марки 3411 толщиной 0,5 мм.

49. При исполнении машины по степени защиты IP44 и способам охлаждения IC0041 и IC0141 индукция в сердечнике главного полюса для холоднокатаных сталей выдерживается в диапазоне $B_г = 1{,}3\ldots1{,}5$.

50. Коэффициент магнитного рассеяния главного полюса принимается равным $\sigma_г = 1{,}15\ldots1{,}2$.

51. Ширина выступа полюсного наконечника, м

$$b_{гв} = 0{,}1\ldots0{,}15\ b_p\,.$$

52. Ширина сердечника главного полюса $b_т$, м

$$b_т = (b_р - 2b_{гв}).$$

53.Проверяем величину индукции в сердечнике полюса, Тл

$$B_г = \sigma_г \Phi_{\delta ном} / (k_c l_т b_т),$$

где $l_т = l_\delta$ и сравниваем с рекомендуемым значением (см. п. 49)

54. Сечение станины, м$^2$

$$S_c = \frac{\sigma_г \Phi_{\delta ном}}{2B_c},$$

здесь коэффициент рассеяния $\sigma_г = 1{,}15$, $B_c = 1{,}3$ – рекомендуемая индукция в станине, Тл (см. [1, § 11.6]).

55. Длина станины, м

$$l_c = l_г + 0{,}4D.$$

56. Высота станины, м

$$h_c = \frac{S_c}{l_c}.$$

57. Внешний диаметр станины, м

$$D_{вн} = 2h - (8...10)\,10^{-3}.$$

58. Внутренний диаметр станины, м

$$d_c = D_{вн} - 2h_c.$$

59. Высота главного полюса, м

$$h_1 = \frac{d_c - (D + 2\delta)}{2},$$

здесь $\delta$ – воздушный зазор (см. [1, рис. 11.17]), величина которого определяется с учетом влияния реакции якоря и при выполнении одинаковой величины вдоль главного полюса может быть выбрана из табл. 1.12

Таблица 1.12

| $D$, мм | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 |
|---|---|---|---|---|---|
| $\delta$, мм | 0,6 1,0 | 0,8 1,2 | 1,2 1,8 | 1,5 2,0 | 1,5 2,1 |

Большая величина зазора обеспечивает устойчивую работу электродвигателя, но при этом увеличивается расход меди на обмотки возбуждения.

### 1.3.2. РАСЧЕТНЫЕ СЕЧЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

60. Сечение воздушного зазора, м$^2$

$$S_\delta = b_p l_\delta .$$

61. Длина стали якоря, м

$$l_{\text{ст}} = l_\delta k_{\text{с}} .$$

62. Минимальное сечение зубцов якоря, м$^2$

$$S_z = \frac{Z\alpha_\delta b_z l_\delta k_{\text{с}}}{2p} .$$

63. Сечение спинки якоря, м$^2$

$$S_j = l_{\text{ст}} h_j .$$

64. Сечение сердечника главного полюса, м$^2$

$$S_{\text{г}} = k_{\text{с}} l_{\text{г}} b_{\text{г}} .$$

65. Сечение станины (см. рис. В4) $S_{\text{с}}$ (м$^2$) берем из п. 59.

### 1.3.3. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ И ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИК

Перед расчетом магнитной цепи следует уточнить все размеры магнитопровода. Полученные для номинальной ЭДС значения индукций на отдельных участках магнитопровода необходимо сравнить с допустимыми.

#### 1.3.3.1. СРЕДНИЕ ДЛИНЫ МАГНИТНЫХ ЛИНИЙ

66. Воздушный зазор δ (м), см. п. 59 и табл. 1.12.

67. Коэффициент воздушного зазора $k_\delta$, учитывающий наличие пазов в якоре (см [1, рис. 11.50, *а*, *б*]), при учете только зубчатости ротора $k_\delta = k_{\delta a}$:

$$k_{\delta a} = \frac{t_{z1} + 10\delta}{t_{z1} - b_{\text{ш}} + 10\delta} .$$

68. Расчетная длина воздушного зазора, м

$$L_\delta = k_{\delta a}\delta .$$

69. Длина магнитной линии в зубцах якоря, м

$$L_z = h_{\text{п}} - 0,2r_1 .$$

70. Длина магнитной линии в спинке якоря, м

$$L_j = \frac{\pi \; D_0 + h_j}{4p} + \frac{h_j}{2} .$$

71. Длина магнитной линии в сердечнике главного полюса, м

$$L_1 = h_1 .$$

72. Воздушный зазор между главным полюсом и станиной, м

$$L_{\text{сп}} = 2l_1 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-4} .$$

73. Длина магнитной линии в станине, м

$$L_{\text{с}} = \frac{\pi \; D_{\text{вн}} - h_{\text{с}}}{4p} + \frac{h_{\text{с}}}{2} .$$

### 1.3.3.2.ИНДУКЦИЯ В РАСЧЕТНЫХ СЕЧЕНИЯХ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Расчетные сечения магнитной цепи из раздела 3.2 (пп. 57–62)

74. Индукция в воздушном зазоре, Тл

$$B_{\delta\text{ном}} = \frac{\Phi_{\delta\text{ном}}}{S_\delta} ,$$

где предварительное значение магнитного потока на полюс берется из п. 37.

75. Индукция в сечении зубцов якоря, Тл

$$B_z = \frac{\Phi_{\delta\text{ном}}}{S_z} .$$

76. Индукция в спинке якоря, Тл

$$B_J = \frac{\Phi_{\delta ном}}{2S_J}.$$

77. Индукция в сердечнике главного полюса, Тл

$$B_г = \frac{\sigma_г \Phi_{\delta ном}}{S_г}.$$

Для стали 3411 допустимое значение $B_г \leq 1{,}5$ Тл.

78. Индукция в станине, Тл

$$B_с = \frac{\sigma_г \Phi_{\delta ном}}{2S_с}.$$

79. Индукция в воздушном зазоре между главным полюсом и станиной, Тл

$$B_{сп} = B_г.$$

### 1.3.3.3. МАГНИТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

80. Магнитное напряжение воздушного зазора, А

$$F_\delta = 0{,}8 B_{\delta ном} L_\delta \cdot 10^6.$$

81. Коэффициент вытеснения потока

$$K_z = \frac{t_{z1} l_\delta}{b_z l_{ст}}.$$

82. Магнитное напряжение зубцов якоря, А

$$F_z = H_z L_z,$$

где $H_z$ напряженность магнитного поля в зубцах якоря (А/м) определяем по [1, П2.4] для стали 2312 с учетом коэффициента вытеснения потока $K_z$.

83. Магнитное напряжение ярма якоря,

$$F_J = H_J L_J,$$

где $H_j$ – напряженность магнитного поля в ярме якоря (А/м) определяем по [1, П1 8] для выбранной марки стали 2312 сердечника ротора

84. Магнитное напряжение сердечника главного полюса, А

$$F_г = H_г L_г ,$$

где $H_г$ – напряженность магнитного поля в сердечнике главного полюса (А/м) определяем по [1, П1.16] для стали 3411 сердечника главного полюса

85. Магнитное напряжение воздушного зазора между главным полюсом и станиной, А

$$F_{сп} = 0,8 B_{\text{I}} L_{сп} \; 10^6 .$$

86. Магнитное напряжение станины, А (см. рис. В2, В4)

$$F_с = H_с L_с ,$$

где $H_с$ – напряженность магнитного поля в станине (А/м) определяем по [1, П1 15] для стали марки Ст3.

87. МДС на полюс, А

$$F_\Sigma = F_\delta + F_z + F_j + F_{\text{I}} + F_{сп} + F_с .$$

88. МДС переходного слоя, А

$$F_{\delta zj} = F_\delta + F_z + F_j .$$

Расчет магнитной цепи выполняется в диапазоне изменения ЭДС от 0,25 до 1,3…1,4 $E_{ном}$ (см. табл. 1.13).

89. По данным из табл. 1.13 строятся магнитная (Г16) $B_\delta = f(F_\Sigma)$ и переходная $B_\delta = f(F_{\delta zj})$ характеристики, рис. 1.5.

Таблица 1 13

| Расчетная величина | Единица измерения | 0,25, $E_н$ | 0,5, $E_н$ | 0,75, $E_н$ | 0,9, $E_н$ | $E_н$ | 1,1, $E_н$ | 1,2, $E_н$ | 1,3, $E_н$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Магнитный поток, $\Phi_{\delta ном}$ | | | | | | | | | |
| Магнитная индукция | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| в воздушном зазоре, $B_\delta$ | | | | | | | | | |
| Магнитное напряжение воздушного зазора, $F_\delta$ | | | | | | | | | |
| Магнитная индукция в зубцах якоря $B_z$ | | | | | | | | | |
| Напряженность магнитного поля в зубцах якоря $H_z$ | | | | | | | | | |
| Магнитное напряжение зубцов $F_z$ | | | | | | | | | |
| Магнитная индукция в спинке якоря $B_j$ | | | | | | | | | |
| Напряженность магнитного поля в спинке якоря $H_j$ | | | | | | | | | |
| Магнитное напряжение ярма якоря $F_j$ | | | | | | | | | |
| Магнитный поток главного полюса $\Phi_г$ | | | | | | | | | |
| Магнитная индукция в сердечнике главного полюса $B_г$ | | | | | | | | | |
| Напряженность магнитного поля в сердечнике главного полюса $H_г$ | | | | | | | | | |
| Напряженность магнитного поля в станине $H_с$ | | | | | | | | | |
| Магнитное напряжение в станине $F_с$ | | | | | | | | | |
| Сумма магнитных напряжений всех участков магнитной цепи $\Sigma F$ | | | | | | | | | |
| Сумма магнитных напряжений участков переходного слоя $F_{\delta zj}$ | | | | | | | | | |

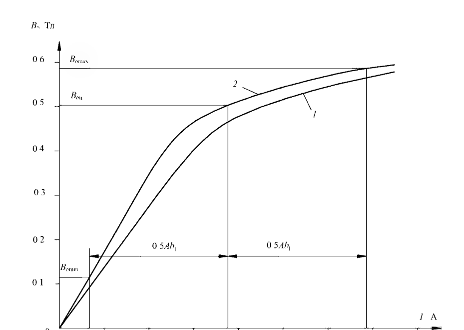



*Рис 1 5* Магнитная характеристика (*1*) и переходная характеристика (*2*) намагничивания

### 1.3.3.4. РАЗМАГНИЧИВАЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ РЕАКЦИИ ЯКОРЯ $F_{dq}$

Методики учета влияния *поперечной реакции якоря* (Г17) на поле обмоток возбуждения разнообразны. Простой и достаточно наглядной можно считать графоаналитическую методику, использующую построенные характеристики: магнитную и переходную:

$$F_{dq} = \frac{b_{\text{р}} A \left[ B_{\delta\text{н}} - B_{\delta\min} \quad B_{\delta\max} - B_{\delta\text{н}} \right]}{6 \; B_{\delta\text{н}} \cdot B_{\delta\min} + B_{\delta\max} \quad B_{\delta\text{н}}}.$$

Здесь $B_{\delta\min}$ и $B_{\delta\max}$ найдены из переходной характеристики, $B_{\delta\text{н}}$ – индукция в воздушном зазоре при номинальном потоке якоря, взята из расчета.

## 2. КОЛЛЕКТОР И ЩЕТКИ

Конструкцию коллектора (см. рис. В7–В9) и его диаметр (п 23) выбирают в зависимости от мощности машины, скорости вращения, диаметра якоря и глубины его пазов.

Длина рабочей поверхности коллектора рассчитывается с учетом возможности правильного расположения щеток на одном щеточном болту, типа щеткодержателей и сдвига щеток вдоль коллектора, выполняемого для обеспечения большей равномерности износа его поверхности

Размеры щеток должны соответствовать ГОСТу. Определяющим при выборе щеток является площадь щеточного контакта и ширина щеток, которая предварительно рассчитывается в зависимости от выбранного значения щеточного перекрытия.

90. Оценим ширину щетки, м

$$b_{щт} = 2...4\ t_k,$$

где $t_k$ – коллекторное деление из п. 25, и выбираем (см. таблицу) стандартные размеры щетки $b_{щт}$, $l_{щт}$ (см. [1, табл. П4.1]).

Т а б л и ц а 1.14

| Выберем $b_{щт}$, мм – любое значение | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 5 | 6,3 | 8 | 10 | 12,5 | 16 | 20 | 25 | 32 | 40 |
| $b_{щт} < l_{щт}$ | Выбираем $l_{щт}$, мм – не более чем из шести последующих значений | | | | | | | | | |

91. Поверхность соприкосновения щетки с коллектором, м²

$$S_{щт} = l_{щт} b_{щт}.$$

92. Допустимая плотность тока под щетками, А/м²

$$J_{щт} = 11 \cdot 10^4\ \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

93. Число щеток на болт

$$N_{щт} = \frac{I_{ном}}{p S_{щт} J_{щт}}.$$

Округляем число щеток до целого числа.

94. Поверхность соприкосновения всех щеток с коллектором, м$^2$

$$\Sigma S_{щ} = 2pS_{щт}N_{щт}.$$

95. Проверяем плотность тока под щетками, А/м$^2$

$$J_{щт} = \frac{2I_{ном}}{\Sigma S_{щ}}.$$

96. Активная длина коллектора, м

$$l_k - N_{щт}\ \ l_{щт} + 8\cdot 10^{-3}\ \ + 10^{-2}.$$

# 3. РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИИ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКТОРА

## 3.1. РАСЧЁТ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОЛЮСОВ

### 3.1.1. КОММУТАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Проверка коммутации заключается в расчете возникающей в коммутируемых секциях величины реактивной ЭДС $E_р$ и ЭДС $E_к$, создаваемой добавочным полюсом. В машинах средней и большой мощности дополнительные полюсы устанавливаются в любом случае

97. Укорочение обмотки в коллекторных делениях принимают всегда со знаком плюс

$$\varepsilon_k = \frac{K}{2p} - y_1.$$

98. Ширина зоны коммутации, м (см. пояснения к п. 11.75 [1]) принимают всегда со знаком плюс

$$b_{зк} - \left(\varepsilon_k - \frac{a}{p} + U_п + \frac{b_{щт}}{t_k}\right) t_k \frac{D}{D_k}.$$

99. Ширина нейтральной зоны, м

$$b_{нз} = \tau - b_p,$$

где $b_p$ – ширина полюсного наконечника (см. п. 13)

100. Отношение ширины зоны коммутации к ширине нейтральной зоны

$$K_0 = \frac{b_{\text{зк}}}{\tau - b_p}.$$

101. Проверяем отношение $K_0$, которое должно быть в пределах

$$K_0 \leq (0{,}55...0{,}7).$$

102. Уточняем геометрию пазов ротора $h_{\text{щ}}$, $b_{\text{щ}}$ (п. 30) и его длину $l_a = l_\delta$ (п 22)

103. Линейная скорость ротора, м/с

$$\upsilon_a = \frac{\pi D n_{\text{ном}}}{60}.$$

104. Коэффициент магнитной проводимости паза ротора (см. п. 11.69 и рис 11.13 с размерами полузакрытых пазов [1])

$$\lambda = 0{,}6\frac{h_{\text{п}}}{2r2} + \frac{l_{\text{л}}}{l_{\text{а}}} + \frac{2{,}5 \cdot 10^5 a}{W_c l_a A \upsilon_a p}.$$

105. *Реактивная* ЭДС (Г18) добавочных полюсов, В (по 11,68 [1])

$$E_{\text{р}} = 2\lambda W_c l_\delta A \upsilon_a \cdot 10^{-6}.$$

### 3.1.2. ГЕОМЕТРИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОЛЮСОВ

106. Воздушный зазор под добавочным полюсом, м (см. рис В3 и 1.4).

Зазор под дополнительными полюсами следует выполнять несколько большей величины, чем под главными полюсами. Сечение стали дополнительных полюсов должно обеспечивать сравнительно небольшую индукцию в них, для того чтобы зависимость потока дополнительного полюса от его намагничивающей силы была близка к прямолинейной

107. Расчетная длина воздушного зазора под добавочным полюсом, м

$$L_{\delta\text{д}} = k_{\delta\text{д}} \delta_{\text{д}},$$

где коэффициент воздушного зазора под дополнительным полюсом равен

$$k_{\delta д} = \frac{t_{z1} + 10\delta_д}{t_{z1} - b_ш + 10\delta_д}.$$

108. Средняя индукция в воздушном зазоре под добавочным полюсом, Тл

$$E_{рр} = 1{,}1E_p.$$

Принимаем для *ускоренной коммутации* (Г19)

$$B_{\delta д} = \frac{E_{рр}}{2W_c l_\delta \upsilon_a}.$$

109. Ширину наконечника добавочного полюса принимаем в пределах, м (согласно п. 11.82 [1])

$$b_{дн} = (0{,}28.....0{,}56)b_{зк}.$$

Расчетная ширина наконечника добавочного полюса, м

$$b_{д1} = b_{дн} + 2\delta_д.$$

110. Магнитный поток добавочного полюса в воздушном зазоре, Вб

$$\Phi_{\delta д} = B_{\delta д} l_\delta b_{д1}.$$

Магнитный поток в сердечнике добавочного полюса, Вб

$$\Phi_д = \sigma_д \Phi_{\delta д},$$

где коэффициент рассеяния добавочного полюса $\sigma_д$ – 2,5.. 3,5 (см [1, § 11.9])

111. Сечение сердечника добавочного полюса, м$^2$

$$S_д = l_\delta b_{\delta дн} k_c.$$

112. Расчетная индукция в сердечнике добавочного полюса, Тл

$$B_{сд} = \frac{\Phi_д}{S_д}.$$

113. Высота добавочного полюса, м

$$L_д = \frac{d_c - D - 2\delta_д}{2},$$

где $d_c$ – внутренний диаметр станины (п. 58).

### 3.1.3. РАСЧЕТ ОБМОТКИ ДОБАВОЧНЫХ ПОЛЮСОВ

114. Расчет МДС *обмотки добавочных полюсов* (Г20).

Магнитная индукция в воздушном зазоре, Тл

$$B_{\delta д} = \frac{\Phi_{\delta д}}{b_{дн} l_\delta}.$$

Магнитное напряжение воздушного зазора, А

$$F_{\delta д} = 0,8 L_{\delta д} B_{\delta д} \cdot 10^6.$$

Магнитная индукция в зубцах якоря, Тл

$$B_z = K_z B_{\delta д}.$$

Напряженность магнитного поля в зубцах якоря $H_z$, А/м смотрим по кривой намагничивания в [1, П2.4] для стали 2312 с учетом коэффициента вытеснения потока $K_z$

$$K_z = \frac{t_{z1} l_\delta}{b_z l_{ст}}.$$

Магнитное напряжение зубцов якоря, А

$$F_z = H_z L_z.$$

Магнитная индукция в ярме:

– на участке согласного направления главного потока и потока добавочных полюсов, Тл

$$B_{j1} = \frac{\Phi_{\delta ном} + \Phi_{\delta д}}{2S_j};$$

– на участке встречного направления главного потока добавочных полюсов

$$B_{J2} = \frac{\Phi_{\delta\text{ном}} - \Phi_{\delta\text{д}}}{2S_J}.$$

Напряженность магнитного поля смотрим по кривой намагничивания по [1, П1.8] для выбранной марки стали 2312 сердечника ротора:

– на участке с индукцией $BJ1$,А/м $H_{J1}$

– на участке с индукцией $BJ2$, А/м $H_{J2}$

Средняя напряженность магнитного поля в ярме, А/м

$$H_{J\text{ср}} = \frac{H_{J1} - H_{J2}}{2}.$$

Магнитное напряжение якоря, А

$$F_{J\text{ср}} = H_{J\text{ср}} L_J .$$

Магнитный поток добавочного полюса, Вб

$$\Phi_{\text{д}} = \sigma_{\text{д}} \Phi_{\delta\text{д}} .$$

Магнитная индукция в сердечнике добавочного полюса, Тл

$$B_{\text{сд}} = \frac{\Phi_{\text{д}}}{S_{\text{д}}}.$$

Напряженность магнитного поля в сердечнике добавочного полюса $H_{\text{сд}}$, А/м смотрим по кривой намагничивания для стали Ст3 при $D \le 160$ мм (см. [1, П1.15]), при $D > 160$ мм, смотрим по кривой намагничивания для стали марки 3411 толщиной 1,0 мм (см. [1, П1.16]).

Магнитное напряжение сердечника добавочного полюса, А

$$F_{\text{сд}} = L_{\text{д}} H_{\text{сд}} .$$

Магнитное напряжение воздушного зазора между станиной и добавочным полюсом. Рабочий зазор между станиной и добавочным полюсом принимаем $\delta_{сдп} = 0{,}2\cdot 10^{3}$

$$F_{\delta сдп} - 0{,}8 B_{сд} \delta_{сдп} \;\; 10^{6} .$$

$$\Phi_{г} = \sigma_{г} \Phi_{\delta ном} .$$

Магнитная индукция в станине:

· на участке согласного направления магнитных потоков главного и добавочного полюсов $B_{с1} = \dfrac{\Phi_{г} + \Phi_{д}}{2S_{с}}$ ;

· на участке встречного направления магнитных потоков главного и добавочного полюсов $B_{с2} = \dfrac{\Phi_{г} - \Phi_{д}}{2S_{с}}$ .

Напряженность магнитного поля в станине смотрим по кривой намагничивания для выбранной стали (см. [1, П1]):

– на участке с индукцией $B_{с1}$, А/м $H_{с1}$;

– на участке с индукцией $B_{с2}$, А/м $H_{с2}$ .

Средняя напряженность магнитного поля в станине

$$H_{сср} = \frac{H_{с1} \quad H_{с2}}{2} .$$

Магнитное напряжение участка станины

$$F_{с} = H_{сср} L_{с} .$$

Сумма магнитных напряжений всех участков .

$$F_{д\Sigma} = F_{\delta д} + F_{z} + F_{j} + F_{с} + F_{сд} + F_{\delta сдп} .$$

115. МДС обмотки добавочных полюсов, А

$$F_{д} = F_{д\Sigma} + A\frac{\tau}{2} .$$

116. Число витков добавочного полюса на один полюс (по п 11 87 [1]) округляется до целого числа

$$W_д = \frac{F_д}{I_{ном}}.$$

При токе $I_д$ меньше 1000 А целесообразно принимать $a_д = 1$. Для многослойных обмоток выбираем согласно рекомендации в [1, § 11 9] плотность тока $J_1 = (2 \ldots 3)\ 10^6$ А/м$^2$ (см. [1, с. 641]).

117. Предварительное сечение проводников, м$^2$ (по [1, п 11 88])

$$q_д = \frac{I_{ном}}{a_д J_д}.$$

118. Принимаем проводник обмотки добавочных полюсов: круглый провод марки ПСД (см. [1, табл. 11.18]) размерами (табл. П3.1 и П3.3):

- сечение провода $q_д$, м$^2$ (табл. 1.6),
- диаметр $d_г$, м (табл. 1.6),
- диаметр изолированного провода, м $d_{из}$.

Выполняем эскиз катушки добавочного полюса и определяем предварительное значение ширины катушки $b_{кт\,д}$ (см. [1, рис. 11 24]).

119. Принимаем сердечник полюса короче якоря на $1 \cdot 10^{-3}$ м с каждой стороны для создания опоры для катушки. Длина сердечника, м

$$l_д = l_\delta - 2 \cdot 10^{-3}.$$

120. Средняя длина витка обмотки добавочного полюса, м (по [1, п. 11.89])

$$l_{дср} = 2(l_д + b_{дн}) + \pi\ (b_{кт\,д} + 2\ \Delta_{из}),$$

где $\Delta_{из}$ – односторонний размер зазора между сердечником добавочного полюса и катушкой с учетом изоляции сердечника: $\Delta_{из} = (1,7 \ldots 2,2)\ 10^{-3}$ м, при диаметрах якоря до 500 мм, а ширина добавочного полюса $b_{кт\,д}$ определяется из эскиза катушки добавочного полюса

121. Полная длина проводников обмотки, м

$$L_д = 2 p l_{дср} W_д.$$

122. Сопротивление обмотки добавочных полюсов при температуре 20 °С, Ом

$$R_д = \frac{L_д}{57 \cdot 10^6 q_д a_д^2}.$$

123. Сопротивление обмотки добавочных полюсов при температуре 75 °С, Ом

$$R_{д75} = 1{,}22 R_д.$$

124. Масса меди обмотки добавочных полюсов, кг

$$m_д = 8{,}9 \cdot 10^{\;3} L_д q_д.$$

## 3.2. ПОТЕРИ ХОЛОСТОГО ХОДА

В работе необходимо определить потери как в *режиме холостого хода* (21), так и под нагрузкой.

Различают *потери магнитные основные* (Г10) – в электротехнической стали ярма и зубцов якоря и поверхностные – в полюсных наконечниках.

*Основные электрические потери* (Г22) – в обмотках якоря, добавочных полюсов, обмотках возбуждения и в щеточных контактах.

*Механические потери* (Г23) на трение в подшипниках и вентиляционные могут быть определены совместно по эмпирическим формулам или кривым, полученным на основании испытаний машин нормального исполнения Потери на трение щеток о коллектор рассчитываются для каждой конкретной машины.

*Добавочные потери* (Г24) для машин, спроектированных без существенных отклонений от нормального исполнения, определяются в соответствии с рекомендациями ГОСТ.

125. Потери на трение щеток о коллектор, Вт·

$$P_{тщ} = \Sigma S_{щт} p_{щ} f \mathrm{v}_k,$$

где $p_щ$ · давление на щетку; для щетки марки ЭГ-14 $p_щ = 3 \cdot 10^4$ Па; $f$ – коэффициент трения щетки $f = 0{,}2$.

126. Потери в подшипниках и на вентиляцию, $P_{тп} + P_{вент} =$ $= P_{тп\ вент}$ Вт, определяются по рис. 11.28 [1].

127. Масса стали ярма якоря, кг определяется по 10.103 [1]

$$m_J = 7{,}8\ 10^{-3}\frac{\pi\left[\left(D - 2h_\text{п}\right)^2 - D_0^2\right]l_\text{ст}k_\text{с}}{4}.$$

128 Условная масса стали зубцов якоря, кг

$$m_z = 7800Zb_z\left(h_1 + \frac{r_1 + r_2}{2}\right) l_\delta k_\text{с}.$$

129. Магнитные потери в ярме якоря, Вт

$$p_J = 2.3\cdot 1.75B_J^2,$$

$$P_J = m_J p_J.$$

130. Магнитные потери в зубцах якоря, Вт

$$p_z = 2{,}3\cdot 1{,}75B_z^2,$$

$$P_z = m_z p_z.$$

131. Сумма потерь

$$\Sigma P_0 = P_\text{тщ} + P_\text{тп вент} + P_J + P_z.$$

132. Ток якоря, А и ЭДС холостого хода, В

$$I_\text{х х} = \frac{\Sigma P_0}{U_\text{ном}},$$

$$E_\text{х х} = U_\text{ном} - I_\text{х х}\left(R_a + R_\text{д}\right) - 2\Delta U_\text{щ},$$

где $2\Delta U_\text{щ} = 2{,}5$ В – падение напряжения в щеточном контакте, выбирается согласно табл. П4.2 [1].

133. Магнитный поток на х.х., Вб

$$\Phi_\text{х х} = \frac{60E_\text{х х}a}{pNn_\text{max}}.$$

134. Индукция в воздушном зазоре в режиме х.х., Тл

$$B_\delta = \frac{\Phi_{\text{х х}}}{\alpha_\delta \tau l_\delta}.$$

## 3.3. РАСЧЕТ ОБМОТОК ВОЗБУЖДЕНИЯ

Намагничивающая сила обмоток возбуждения в нашем случае определяется в режиме холостого хода при номинальной нагрузке с помощью магнитной характеристики и по переходной характеристике путем добавочных построений, учитывающих степень влияния поперечной реакции якоря.

Метод расчета числа витков и сечения провода обмоток возбуждения зависит от назначения машины и системы ее возбуждения

При расчете сечения и числа витков на полюс параллельной обмотки необходимо принять во внимание коэффициент запаса по возбуждению и увеличение сопротивления обмотки при нагревании.

Следует учесть, что обмотки возбуждения обычно не имеют параллельных ветвей ($a = 1$), лишь при токах якоря, больших 200 А, последовательную обмотку соединяют в две ветви и реже в большее число параллельных ветвей.

135. По магнитной характеристике определяем МДС холостого хода, т. е. ту, которую создает параллельная обмотка, А $\Sigma F_0$

$$F_{\text{ш}} = \Sigma F_0.$$

136. ЭДС номинального режима, В.

$$E_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}} \; R_a + R_{\text{д}} \; \cdot 2 \cdot \Delta U_{\text{щ}}.$$

137. Номинальный магнитный поток в воздушном зазоре, Вб

$$\Phi_{\text{ном}} = \frac{60 E_{\text{ном}} a}{p N n_{\text{ном}}}.$$

138. По магнитной характеристике находим МДС $\Sigma F_{\text{н}}$, А

139. Размагничивающее действие якоря находим по переходной характеристике $F_{qd}$, А (см. раздел 1.3.3.4).

140. Необходимая МДС последовательной обмотки возбуждения

$$F_{\text{с}} = \Sigma F_{\text{н}} + F_{qd} - F_{\text{ш}}.$$

### 3.3.1. РАСЧЕТ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

141. Принимаем предварительно ширину катушки параллельной обмотки возбуждении $b_{ктв}$, м, односторонний зазор между катушкой и полюсом $\Delta_{изк}$, м, тогда, средняя длина витка обмотки, м

$$l_{срш} = 2\left(l_{г} + b_{г}\right) + \pi\left(b_{ктв} + \Delta_{изк}\right).$$

Порядок определения размеров катушек обмотки смотри в [1, § 11.7]

142. Сечение меди параллельной обмотки, м$^2$.

Число параллельных ветвей обмотки параллельного возбуждения при последовательном соединении катушек $a = 1$, коэффициент запаса МДС обмотки $k = 1,1\ldots1$,

$$q_{ш} = \frac{k_{з} \cdot 2pF_{ш}l_{срш}a}{57 \cdot 10^6 U_{ном}}.$$

Принимаем по табл. 1.6 провод (см. [1, п. 11.18], марку и размеры провода – по табл. П 3.1 [1]):

- диаметр неизолированного провода, $d_1$, м,
- диаметр изолированного провода $d_{из}$, м,
- сечение провода $S_{из}$, м$^2$.

143. Выбираем номинальную плотность тока $J_{д} = (2\ldots3)\ 10^6$А/м$^2$ для машин со степенью защиты IP44 (см. [1, с. 632].

144. Число витков на полюс округляем до целого числа

$$w_{ш} = \frac{F_{ш}}{J_{ш}q_{ш}}.$$

145. Определяем номинальный ток возбуждения, А

$$I_{ш} = \frac{F_{ш}}{w_{ш}}.$$

146. Полная длина обмотки, м

$$L_{ш} = 2pl_{срш}w_{ш}.$$

147. Сопротивление обмотки возбуждения при температуре 20 °С, Ом

$$R_{ш} = \frac{L_{ш}}{57 \cdot 10^6 q_{ш}}.$$

148. Сопротивление обмотки возбуждения при температуре 75 °С, Ом

$$R_{ш} = 1,22 R_{ш}.$$

149. Масса меди обмотки возбуждения, кг

$$m_{мш} = 8,9 \cdot 10^3 L_{ш} q_{ш}.$$

### 3.3.2. РАСЧЕТ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

150. Ток последовательной обмотки возбуждения, А

$$I_{с} = I_{ном}.$$

151. Число витков последовательной обмотки возбуждения на полюс округляем до целого числа

$$w_{с} = \frac{F_{с}}{I_{с}}.$$

152. Сечение меди последовательной обмотки, м$^2$

$$q_{с} - \frac{I_{с}}{J_{ш}}.$$

Принимаем предварительно ширину катушки параллельной обмотки $b_{ктс}$, м.

Односторонний зазор между катушкой и полюсом $\Delta_{изк}$, м, тогда средняя длина витка обмотки, м

$$l_{срс} = 2\ l_{г} + b_{г}\ + \pi\ b_{ктс} + \Delta_{изк}\ .$$

Принимаем по табл 10.18 [1] провод, по табл. П 3.2 [1] – размеры провода:

размер по большей стороне $b$, м;

– размер по меньшей стороне $a$, м;

– сечение провода $S_{\text{из}}$, м$^2$:

$$q_{\text{с}} = S_{\text{из}}.$$

153. Полная длина обмотки, м

$$L_{\text{св}} = 2pl_{\text{срс}}w_{\text{с}}.$$

154. Сопротивление обмотки возбуждения при температуре 20 °С, Ом

$$R_{\text{с}} = \frac{L_{\text{св}}}{57 \cdot 10^6 q_{\text{с}}}.$$

155. Сопротивление обмотки возбуждения при температуре 75 °С, Ом

$$R_{\text{с}75} = 1{,}22 R_{\text{с}}.$$

156. Масса меди обмотки возбуждения, кг

$$m_{\text{мс}} = 8{,}9 \cdot 10^3 L_{\text{св}} q_{\text{с}}.$$

157. Уточняем ток двигателя, А

$$I_{\text{ут}} = I_{\text{с}} + I_{\text{ш}}.$$

Конструкции изоляции и крепления обмоток главных полюсов приведены в [1, табл 11 2, 11.3].

## 4. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

При построении *рабочих характеристик* (Г25) двигателя и уточнении его номинальных данных принимаем, что потери холостого хода двигателя практически не меняются при изменении нагрузки и составляют $\Sigma P_0$, Вт.

При расчете характеристик принимаем напряжение питания $U_{\text{ном}} = 220$ В, ток возбуждения параллельной обмотки соответствует номинальному значению тока возбуждения, рассчитанному в п. 160

158. МДС реакции якоря.

Расчеты по переходной характеристике значений $F_{qd}$ при нескольких значениях тока якоря и графическое построение характеристики

$F_{qd} - f(I)$ показывают, что эту характеристику можно аппроксимировать функцией типа

$$F_{qd} - F_{qd}\left(\frac{I_t \quad 15}{I_{\text{ном}} - 15}\right).$$

Поэтому в дальнейшем будем использовать эту функцию для учета размагничивающего действия реакции якоря при построении рабочих характеристик двигателя.

## Порядок расчета

159. Задаемся значением тока якоря $I_t = 0 \ldots I_t = 1{,}25 I_{\text{ном}}$.

Ток в последовательной катушке и ток якоря равны, А

$$I_{\text{с}} = I_t .$$

160. Ток двигателя, А

Ток двигателя равен сумме токов в якоря и параллельной катушки

$$I_1 = I_t + I_{\text{ш}} ,$$

где $I_{\text{ш}} = \dfrac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{ш75}}}$.

161. Суммарная намагничивающая сила, А

Намагничивающие силы последовательной и параллельной катушек находим исходя из токов этих катушек и числа витков, размагничивающее действие реакции якоря · по п.1.3.3.4, тогда

$$\Sigma F - F_{\text{ш}} + F_c - F_{qd} ,$$

где $F_{\text{ш}} = I_{\text{ш}} w_{\text{ш}}$, а $F_{\text{с}} = I_t w_{\text{с}}$.

162. По магнитной характеристике (рис. 1.5) определяем индукцию магнитного поля в воздушном зазоре $B_\delta$, Тл

163. Магнитный поток в воздушном зазоре, Вб

$$\Phi_\delta = B_\delta S_\delta .$$

164. ЭДС обмотки якоря, В

$$E = U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}} \quad R_{\text{ан}} + R_{\text{с75}} + R_{\text{д75}} \quad - 2\Delta U_{\text{щ}} .$$

165. Частота вращения, об/мин

$$n = 60\frac{E}{\Phi_\delta pN}.$$

166. Полезная мощность на валу двигателя, Вт

$$P_2 = EI_t - \Sigma P_0 - P_{\text{доб}}\left(\frac{I_t}{I_{1\text{ном}}}\right)^2.$$

**Расчёт рабочих характеристик**

| № п/п | $I_t$ | $I_1$ | $\Sigma F$ | $\Phi_\delta$ | $E$ | $n$ | $P_2$ | $P_1$ | η | М |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | А | А | А | Вб | В | об/мин | кВт | кВт | о е | Нм |
| 1 | 0 Режим х х | | | | | $n_0$ максимальная частота вращения | 0 | | 0 | 0 |
| 2 | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | |
| $t$ | | | | | | | | | | |
| н | | | | | | $n_н$ номинальная частота вращения | $P_{2н}$*[1] | | | |
| $J$ | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |

Номинальная мощность $P_{2н}$*[1] выставляется на графике и затем определяются параметры номинального режима

*Примечание* 1 $n_0$ – максимальная частота вращения не соответствует заданию изменить число витков параллельной обмотки

2 $n_н$ – номинальная частота вращения не соответствует заданию изменить число витков последовательной обмотки

3 Ослабление поля возбуждения приводит к увеличению частоты вращения

167. Потребляемая мощность $P_1 = UI_1$, Вт.

168. Коэффициент полезного действия $\eta = \dfrac{P_2}{P_1}$, о. е.

169. Вращающий момент $M = 9{,}57 \cdot 10^{-3} \dfrac{P_2}{n}$, Н/м.

Результаты расчетов сводят в таблицу и строят графики $I_1 = f(P_2)$, $P_1 = f(P_2)$, $n - f(P_2)$, $M = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$.

Показатели номинального режима двигателя определяются из рабочих характеристик при полезной номинальной мощности $P_{2ном}$.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1 *Проектирование* электрических машин учеб для вузов / И П Копылов Б К Клоков, В П Морозкин, Б Ф Токарев, под ред И П Копылова – 4-е изд , перераб и доп – М Высш шк , 2005 – 767 ил

2 *Копылов И П* Электрические машины. учеб для вузов / И П Копылов 3-е изд , испр М Высш шк , 2002 607с

3 *Шаншуров Г А , Гречкин В В , Комаров А В , Честюнина Т В* Теория и расчет машин постоянного тока учеб -метод пособие для студентов ускоренного и заочного обучения (электронный ресурс) с программой расчета двигателей постоянного тока смешанного возбуждения – Режим доступа [www em power nstu ru 20 04 2010]

4 *Беспалов В Я* Электрические машины учеб пособие для студ высш учеб заведений / В Я Беспалов, Н Ф Котеленец – М Изд центр «Академия», 2006 320 с

5 *Вольдек А И , Попов В В* Электрические машины Введение в электромеханику Машины постоянного тока и трансформаторы учебник для вузов – СПб Питер, 2007 – 320 с ил

## Приложение 1

# ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

### Выбор главных размеров

1 Что называется главными размерами? От чего они зависят?

2 Как влияет величина линейной нагрузки на габариты двигателя, его энергетические показатели? Индукции в зазоре?

3 Что означает степень защиты IP22, IP44?

4 Какие вы знаете стандартные высоты оси вращения?

5 Какие классы изоляции применяются для серии 2 П?

6 В каких случаях применяются простые волновые и петлевые обмотки?

7 Какое допускается напряжение между коллекторными пластинами и почему?

8 Может ли быть число витков в секции дробным?

### Электромагнитные нагрузки

1 Как выбирается сечение эффективного проводника?

2 Каков максимальный диаметр круглого проводника при укладке в полузакрытый паз?

3 Каков максимально возможный коэффициент заполнения паза?

4. Каковы предельные индукции в зубце, ярме якоря?

5 Какие марки сталей применяются для производства машин постоянного тока?

6 Какая изоляция паза используется в двигателях серии 2П?

7 Как выбирается величина воздушного зазора?

### Расчет магнитной цепи и параллельной обмотки возбуждения

1 На какие элементы делится магнитная цепь машины постоянного тока?

2 Как рассчитывается магнитное напряжение участка магнитной цепи?

3. Что такое коэффициент рассеяния главных полюсов?

4 Чем отличается характеристика холостого хода и переходная характеристика?

5. Как определяется размагничивающее действие реакции якоря?

6 Как рассчитываются параметры параллельной обмотки возбуждения?

## Расчет добавочных полюсов

1 Для чего применяют добавочные полюса?

2 Как выбирается зазор под добавочным полюсом?

3 Как проходит по магнитопроводу магнитный поток добавочного полюса?

## Расчет последовательной обмотки возбуждения

1. Какие потери существуют в машинах постоянного тока?

2 Что влияет на магнитные потери и в каких частях машины они выделяются?

3 Для чего применяют последовательную обмотку возбуждения?

4 Как включается эта обмотка?

5 Как изменяется величина размагничивающего действия реакции якоря и намагничивающая сила последовательной обмотки с ростом нагрузки?

6. Как определяется суммарная МДС?

7 Как рассчитывается ЭДС якоря при заданных сопротивлениях и токе якоря?

## Расчет рабочих характеристик двигателя

1 Для чего необходима характеристика холостого хода при расчете рабочих характеристик?

2 Как можно найти частоту вращения двигателя, развиваемый момент на валу, КПД?

3 Для чего производят тепловой и вентиляционный расчеты?

4. Каковы допустимые перегревы для выбранного класса изоляции?

# Приложение 2

## Варианты задания

| № п/п | Мощность, КВт | Частота вращения | | Напряжение, В | Аналог типа |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Ном | Макс | | |
| 1 | 10,5 | 3000 | 4000 | 220 | 2ПН132УХЛ4 |
| 2 | 10,5 | 3000 | 4000 | 440 | 2ПН132УХЛ4 |
| 3 | 8,5 | 2200 | 4000 | 220 | 2ПН132УХЛ4 |
| 4 | 8,5 | 2240 | 4000 | 440 | 2ПН132УХЛ4 |
| 5 | 14 | 3150 | 4000 | 220 | 2ПН132УХЛ4 |
| 6 | 14 | 3150 | 4000 | 440 | 2ПН132УХЛ4 |
| 7 | 13 | 2120 | 4000 | 220 | 2ПН160УХЛ4 |
| 8 | 13 | 2360 | 4000 | 440 | 2ПН160УХЛ4 |
| 9 | 18 | 3150 | 4000 | 220 | 2ПН160УХЛ4 |
| 10 | 18 | 3150 | 4000 | 440 | 2ПН160УХЛ4 |
| 11 | 11 | 1500 | 4000 | 220 | 2ПН160УХЛ4 |
| 12 | 11 | 1600 | 3750 | 440 | 2ПН160УХЛ4 |
| 13 | 16 | 2360 | 4000 | 220 | 2ПН160УХЛ4 |
| 14 | 16 | 2360 | 4000 | 440 | 2ПН160УХЛ4 |
| 15 | 24 | 3150 | 4000 | 220 | 2ПН160УХЛ4 |
| 16 | 24 | 3150 | 4000 | 440 | 2ПН160УХЛ4 |
| 17 | 15 | 1500 | 4000 | 220 | 2ПН180УХЛ4 |
| 18 | 15 | 1500 | 3500 | 440 | 2ПН180УХЛ4 |
| 19 | 26 | 2240 | 3500 | 220 | 2ПН180УХЛ4 |
| 20 | 26 | 2240 | 3500 | 440 | 2ПН180УХЛ4 |
| 21 | 10 | 1000 | 3500 | 110 | 2ПН180УХЛ4 |
| 22 | 10 | 1000 | 3000 | 220 | 2ПН180УХЛ4 |
| 23 | 10 | 1000 | 2500 | 440 | 2ПН180УХЛ4 |
| 24 | 18,5 | 1500 | 3500 | 220 | 2ПН180УХЛ4 |

Окончание таблицы

| № п/п | Мощность, КВт | Частота вращения | | Напряжение, В | Аналог типа |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Ном | Макс | | |
| 25 | 18,5 | 1600 | 3500 | 440 | 2ПН180УХЛ4 |
| 26 | 13 | 1120 | 3500 | 110 | 2ПН200УХЛ4 |
| 27 | 13 | 1120 | 3000 | 220 | 2ПН200УХЛ4 |
| 28 | 13 | 1000 | 2500 | 440 | 2ПН200УХЛ4 |
| 29 | 22 | 1500 | 3500 | 220 | 2ПН200УХЛ4 |
| 30 | 22 | 1500 | 3500 | 440 | 2ПН200УХЛ4 |
| 31 | 36 | 2200 | 3500 | 220 | 2ПН200УХЛ4 |
| 32 | 36 | 2200 | 3500 | 440 | 2ПН200УХЛ4 |
| 33 | 11 | 800 | 3000 | 110 | 2ПН200УХЛ4 |
| 34 | 11 | 800 | 2500 | 220 | 2ПН200УХЛ4 |
| 35 | 11 | 750 | 1850 | 440 | 2ПН200УХЛ4 |
| 36 | 16 | 1000 | 3000 | 220 | 2ПН200УХЛ4 |
| 37 | 16 | 1000 | 2500 | 440 | 2ПН200УХЛ4 |
| 38 | 30 | 1500 | 3500 | 220 | 2ПН200УХЛ4 |
| 39 | 30 | 1500 | 3500 | 440 | 2ПН200УХЛ4 |

**Примечание.** Конкретный вариант задания выдается руководителем

## Приложение 3

# ЭМФ НГТУ

Кафедра электромеханики

Задание на курсовой проект

«Двигатели постоянного тока смешанного возбуждения»

Исходные данные:

* мощность, кВт $P_{ном}$ =_____________________
* частота вращения, об/мин
  номинальная $n_{ном}$ =________________
  максимальная $n_{max}$ =________________
* напряжение, В $U_{ном}$ =______________________
* возбуждение смешанное
* аналог двигателя___________________

Содержание пояснительной записки и перечень графического материала, выполняемого на формате А4:

1. Описание конструктивного исполнения электродвигателя (см аналог).
2. Схема включения электродвигателя на сеть.
3. Выбор главных размеров и расчет обмотки якоря. Компоновка элементов магнитной цепи.
4. Эскиз и спецификация паза ротора с элементами обмотки якоря.
5. Расчет магнитной цепи и выбор параметров обмоток возбуждения.
6. Эскиз поперечного сечения магнитной системы и размещения обмоток возбуждения на полюсах (фрагмент междуполюсного окна).
7. Расчет механической (естественной), скоростной и рабочих характеристик двигателя, их графическое представление.

График выполнения работ

Недели:

1, 2 знакомство с теоретическим материалом по предложенной литературе;

3, 4 выполнение пп. 1 и 2 задания;

5, 6 – выполнение пп. 3 и 4 задания;

7, 8 выполнение пп. 5 и 6 задания;

9, 10 – выполнение п. 7 и представление расчетов на проверку;

11, 12 – оформление пояснительной записки с эскизами и сдача на рецензию,

13, 14, 15 – защита курсового проекта.

Задание получил студент группы._______________________

Фамилия, И , О ________________________________________

## Глоссарий

| № п/п | Термин | Определение |
|---|---|---|
| 1 | Электрическая машина | |
| 2 | Электродвигатель | Электрическая машина, предназначенная для преобразования электрической энергии в механическую энергию |
| 3 | Коллектор | Комплект изолированных друг от друга токопроводящих пластин с расположенными на них щётками, обеспечивающий протекание тока во вращающейся электрической машине из одной части цепи в другую при помощи скользящего контакта |
| 4 | Машина смешанного возбуждения | Машина, имеющая по меньшей мере две обмотки возбуждения, одна из которых соединена с цепью якоря последовательно, а остальные параллельно |
| 5 | Обмотка возбуждения | Обмотка электрической машины, предназначенная для создания магнитного поля возбуждения |
| 6 | Скоростная характеристика вращающегося электродвигателя | Зависимость частоты вращения ротора вращающегося электродвигателя от потребляемого тока |
| 7 | Якорь коллекторной машины постоянного тока | Часть коллекторной машины постоянного тока (обмотка), в которой индуктируется электродвижущая сила (ЭДС) и протекает ток нагрузки |
| 8 | Магнитная индукция в рабочем зазоре электрической машины постоянного тока | Амплитуда кривой распределения магнитной индукции в основном воздушном зазоре в режиме холостого хода электрической машины постоянного тока |
| 9 | Основной воздушный зазор вращающейся электрической машины | Минимальное расстояние в радиальном направлении между неподвижной и движущейся частями магнитопровода вращающейся электрической машины |
| 10 | Основные магнитные потери вращающейся электрической машины | Потери от гистерезиса и вихревых потоков, возникающих в ферромагнитных участках магнитной цепи во вращающейся электрической машине при их перемагничивании основным магнитным потоком |

Продолжение таблицы

| № п/п | Термин | Определение |
|---|---|---|
| 11 | Паз вращающейся электрической машины | Углубление или полость вблизи поверхности магнитопровода статора или ротора вращающейся электрической машины, обращенные к основному воздушному зазору, предназначенные для размещения проводов обмотки |
| 12 | Коммутация коллекторной машины | Переключение секций обмотки якоря коллекторной машины из одной параллельной ветви в другую |
| 13 | Зубец вращающейся электрической машины | Часть магнитопровода между соседними пазами вращающейся электрической машины |
| 14 | Полюс вращающейся электрической машины | Часть сердечника вращающейся электрической машины, на котором расположена обмотка возбуждения или выступающая в направлении воздушного зазора часть магнитопровода |
| 15 | Реакция якоря вращающейся электрической машины | Воздействие магнитодвижущей силы обмотки якоря на магнитное поле вращающейся электрической машины, создаваемое обмоткой возбуждения или постоянными магнитами |
| 16 | Магнитная характеристика вращающейся электрической машины | Зависимость магнитного потока в воздушном зазоре вращающейся электрической машины от тока возбуждения |
| 17 | Поперечная реакция якоря вращающейся электрической машины | Реакция якоря вращающейся электрической машины, образуемая составляющей намагничивающей силы обмотки якоря, создающей магнитный поток, направленный по поперечной оси полюсов |
| 18 | Реактивная коммутационная ЭДС коллекторной машины | Электродвижущая сила, возникающая в коммутируемой секции коллекторной машины вследствие изменения тока в ней и токов в других одновременно коммутируемых секциях, имеющих индуктивную связь с ней |

Окончание таблицы

| № п/п | Термин | Определение |
|---|---|---|
| 19 | Ускоренная коммутация коллекторной машины | Коммутация коллекторной машины, при которой средняя скорость изменения тока в коммутирующей секции в первую половину периода коммутации больше чем во вторую |
| 20 | Обмотка добавочных полюсов вращающейся электрической машины | Обмотка вращающейся электрической машины, расположенная на добавочных полюсах, по которой протекает ток, равный или пропорциональный току нагрузки, и предназначенная для создания коммутирующего поля |
| 21 | Режим холостого хода вращающейся электрической машины | Режим холостого хода вращающегося электродвигателя при номинальном напряжении, но без нагрузки |
| 22 | Основные электрические потери вращающейся электрической машины | Потери в обмотках вращающейся электрической машины, определяемые как произведение сопротивления постоянному току на квадрат тока в обмотке, и электрические потери в скользящих контактах |
| 23 | Механические потери вращающейся электрической машины | Потери вращающейся электрической машины, возникающие в результате трения в подшипниках, трения щёток о коллектор или контактные кольца, трения вращающихся частей о воздух, вентиляционные и другие потери на трение |
| 24 | Добавочные потери вращающейся электрической машины | Потери вращающейся электрической машины, возникающие в результате наличия высших гармонических в кривых намагничивающей силы обмоток, потока рассеяния обмоток, пульсации магнитного потока в воздушном зазоре, вытеснения тока в проводниках и других не основных электромагнитных процессов |
| 25 | Рабочие характеристики вращающегося электродвигателя | Зависимость подводимой мощности, тока в обмотке якоря, частоты вращения, коэффициента полезного действия от полезной мощности на валу при неизменных напряжения питающей сети и внешних сопротивлениях в цепях обмоток |

**ОГЛАВЛЕНИЕ**